

西藏高原干旱半干旱区土壤分形特征及其应用

王小丹¹, 刘刚才¹, 刘淑珍¹, 男达瓦²

(1. 中国科学院、水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都, 610041; 2. 西藏地质地热大队, 西藏 拉萨, 85000)

摘 要:通过对西藏高原干旱半干旱区 4 种土地利用类型的土壤全样和层样采集与测定, 运用土壤粒径的质量分布原理, 计算出它们的分形维数。并分析其与土地利用方式、土壤肥力的关系。同时还探讨了土壤分形维数在剖面不同深度的纵向变化。结果表明: i. 土壤分形维数不仅可以反映土壤质地的均一程度, 而且可以间接反映自然环境变化和人类活动对土壤理化性质的影响。ii. 土壤肥力与土壤分形维数有显著的相关性。当土壤颗粒组成分形维数 $D_p < 2.65$ 和微团聚体组成分形维数 $D_a < 2.44$ 时, 土壤肥力最佳。iii. D_p 值和 D_a 值随深度呈波状变化, 峰值出现的深度与土地利用方式和人类活动密切相关。

关键词:土壤; 分形特征; 土地利用; 土壤肥力; 干旱半干旱

中图分类号: S159, X144

文献标识码: A

1 引 言

分形理论是二十世纪九十年代科学前沿——非线性科学的最重要组成部分。1977 年, 法国数学家 B·曼德布罗特 (Mandelbrot) 出版的奠基性著作《分形: 形、机遇与维数》(Fractal: Form, Chance and Dimension) 提出了分形的三要素, 即构型、机遇和维数, 紧接着于 1982 年出版了《自然界的分形几何学》(The Fractal Geometry of Nature)。这两部著作的发表极大地推进了分形理论研究和应用研究的向前发展^[1]。

土壤是由大小、形状不同的固体组分和空隙以一定形式连结所形成的多孔介质, 土壤粒径、颗粒表面积、颗粒体积、空隙大小等具有自相似特征^[3~5]。土壤中各固体组分的大小、数量、形状及其结合方式决定着土壤的质地与结构, 进而影响土壤的理化性质^[2,5]。因此, 分形理论作为一种新方法被广泛地用来定量描述土壤结构的非线性特征。自 1980 年代以来, 国内外许多学者开展了较为深入的研究^[3,6,7], 但大多集中在土壤质地与分形特征以及不

同土壤类型之间的分形特征比较两个方面。本研究主要探讨不同土地利用方式下, 土壤颗粒、微团聚体质量分布分形与土壤风蚀、土壤肥力之间的关系。把土壤的这种非线性特征与环境要素相结合, 这在以前的文献中并不多见。此外, 研究区域位于西藏高原西部的干旱半干旱区, 自然条件和环境特征在中国乃至全世界都十分独特, 其平均海拔 4 500 m 左右, 素有“高原上的高原”之称, 因此, 本研究还具有显著的区域特色。

2 材料与方法

2.1 土样采集与分析

土样采自藏西高原干旱半干旱区, 采样点的土地利用方式包括 4 种类型: (1) 稀疏灌丛草地; (2) 高盖度草地; (3) 农耕地; (4) 裸土地。为了研究土壤分形特征的纵向变化, 还采集土壤剖面不同深度的分层样。实验室分析测定方法为: 土壤颗粒组成——吸管法, 土壤微团聚体组成——吸管法, 有机质含量——重铬酸钾—外加热法, 有效氮含量——扩散吸收法(测定结果见表 1)。

收稿日期 (Received date): 2003-11-30。

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (50099620)。[Foundation Item: National Natural Science Foundation of China, No. 50099620.]

作者简介 (Biography): 王小丹 (1973-), 男, 博士生, 从事环境退化与生态建设研究。E-mail: wxd@imde.ac.cn [WANG Xiaodan, male, Ph.D., specialized in environment degradation and ecology reconstruction]

表 1 供试土样实验室测定结果
Table 1 The laboratorial results of soil samples

样品 编号	不同粒径(mm)范围内土壤颗粒重量百分比/不同粒径(mm)范围内微团聚体重量百分比(%) [*]							有机质 (%)	有效氮 ppm
	2~1mm	1~0.5mm	0.5~0.25mm	0.25~0.05mm	0.05~0.02mm	0.02~0.002mm	<0.002mm		
S-01	13.71/11.38	4.68/6.40	42.56/33.91	24.60/37.80	3.36/3.70	3.63/4.87	7.46/1.94	0.40	18.14
S-02	1.53/0.67	1.27/1.12	44.60/34.95	34.67/55.55	11.52/1.03	2.37/1.47	4.03/5.21	0.98	27.49
S-03	8.42/7.51	1.56/1.92	10.52/9.83	68.71/73.78	5.41/0.38	1.86/2.95	3.52/3.63	0.23	14.33
S-04	10.39/12.01	2.37/4.05	19.20/19.00	20.04/33.16	9.30/5.72	13.88/10.12	24.83/15.94	1.333	66.703
S-05	11.10/12.57	4.10/3.25	16.27/17.52	31.41/41.32	9.83/6.02	13.06/11.84	14.23/7.48	0.94	30.28
S-06	0.96/1.34	0.51/2.08	27.20/22.10	54.00/57.39	2.96/2.20	4.79/9.02	9.58/5.87	3.38	115.10
S-07	3.28/2.92	0.69/0.96	11.25/12.18	25.85/40.24	12.43/8.66	26.70/22.76	19.80/12.28	1.77	83.13
S-08	1.72/2.32	1.40/1.44	4.17/15.13	21.65/52.91	22.17/11.51	26.09/13.16	22.80/3.53	1.99	98.68
S-09	4.01/2.75	1.12/2.18	11.24/28.12	24.02/46.87	27.40/11.06	20.43/7.67	11.79/1.26	3.14	302.92
S-10	6.06/4.05	1.04/1.58	23.12/17.52	50.20/67.88	5.66/4.64	6.15/2.99	7.77/1.34	1.90	114.68
S-11	4.18/2.16	1.51/2.15	18.60/16.96	39.60/46.30	6.50/7.29	5.49/15.55	24.11/9.59	1.49	59.48
S-12	6.36/5.05	2.12/3.09	32.78/22.64	20.89/57.37	15.75/8.06	11.85/6.10	10.25/1.69	2.53	102.96

^{*} 列中数据为:机械组成/微团聚体

2.2 分形维数的计算方法

研究^[2]表明土壤颗粒大小的分布遵循关系 $NR_i^D = \text{constant}$ (其中 R_i 为第 i 粒级的颗粒半径; N 为粒径大于 R_i 颗粒的数目; D 为颗粒大小分布的分形维数)。由于 N 值很难通过实验直接测得, Arya 和 Paris^[8]、Turcotte^[9]、Alexandra Kravchenko 和 RenduoZhang^[10] 等人基于此关系式先后推导出具有可操作性的计算公式。但 Tyler 和 Wheatcraft^[3]、杨培岭等^[4] 用土壤粒径的重量分布取代数量分布, 采用极限法推导出了土壤粒径分布的分形维数公式更受欢迎(式 1)

$$\left[\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \right]^{3-D} = \frac{W(\delta < \bar{d}_i)}{W_0} \tag{1}$$

式中 \bar{d}_i 是两筛分粒级 \bar{d}_i 与 \bar{d}_{i+1} 间土粒的平均直径; \bar{d}_{\max} 是最大粒级土粒的平均直径; D 是土壤颗粒表面的分形维数; $W(\delta < \bar{d}_i)$ 是土粒直径小于 \bar{d}_i 累

积的重量; W_0 是全部各粒级土粒的重量和。可见公式(1)的参数利用常规实验数据就可直接获得。

由(1)式得到(2)式

$$D = 3 - \frac{\lg W/W_0}{\lg \bar{d}_i/\bar{d}_{\max}} \tag{2}$$

3 结果分析与讨论

3.1 分形维数计算

根据(2)式, 分别以 $\lg(W/W_0)$ 、 $\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$ 为纵、横坐标, 绘制出 4 种土地利用方式下两者的关系图(图 1~图 4), 图中 S-01(P)代表土壤质地、S-01(A)代表微团聚体, 其它样品类推。可以看出, $3-D$ 是 $\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$ 和 $\lg(W/W_0)$ 构成的直线的斜率, 用回归法代入实验数据即可求出 D 值^[11] (见表 2)。

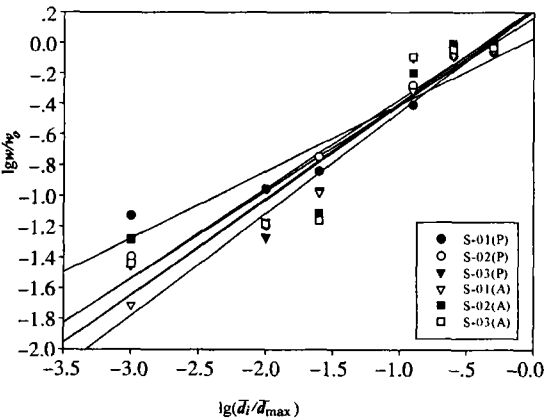


图 1 稀疏灌丛草地
Fig.1 Sparse brushwood pasture

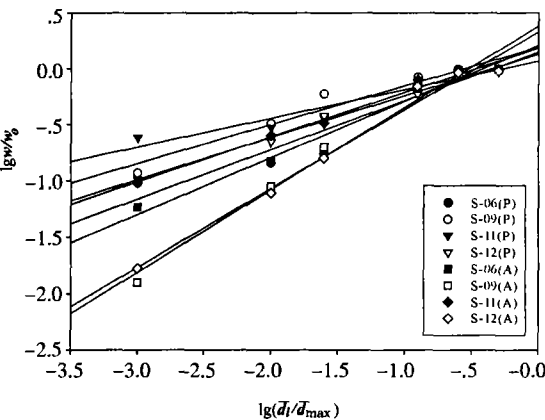


图 2 高盖度草地
Fig.2 High cover pasture

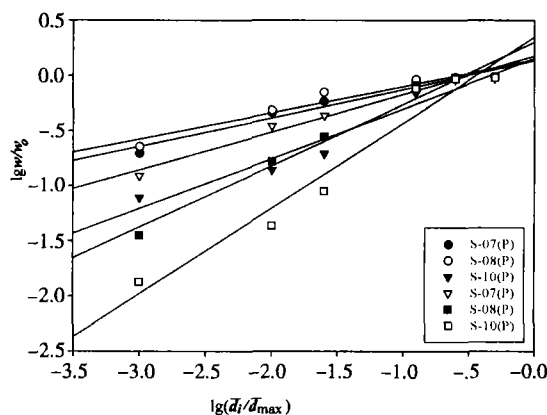


图3 耕地

Fig.3 Cropland

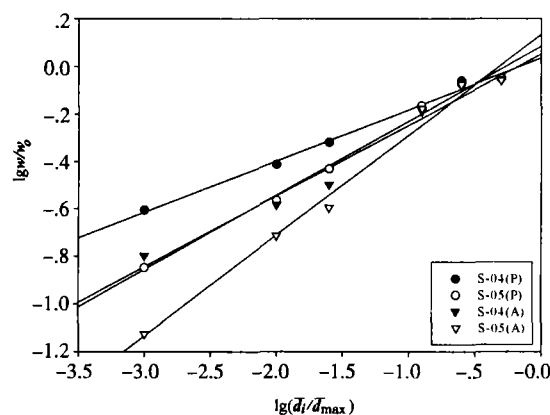


图4 裸地

Fig.4 Bare land

表2 不同土地利用方式下的土壤分形维数

Table 2 Fractal dimension of soil under various land-use methods

样品编号	采样地点	土壤类型	土地利用方式	分形维数*	回归系数*
S-01	32°29'44.1"N 80°10'0.80"E	高山草原土	稀疏灌丛草地	2.5650/2.3371	0.9147/0.9810
S-02	32°24'48.6"N 79°46'12.8"E	高山草原土	稀疏灌丛草地	2.4187/2.4320	0.9460/0.8475
S-03	32°36'26.5"N 80°00'3.90"E	高山草原土	稀疏灌丛草地	2.3767/2.3817	0.9039/0.8691
S-04	33°26'28.2"N 79°47'13.6"E	高山荒漠土	裸土地	2.7833/2.7013	0.9917/0.9727
S-05	32°51'7.6"N 79°29'1.7"E	高山荒漠土	裸土地	2.6868/2.5773	0.9907/0.9844
S-06	32°17'31.1"N 79°58'51.3"E	高山草甸土	高盖度草地	2.5639/2.4982	0.9054/0.9559
S-07	31°20'34.9"N 79°46'47.5"E	耕作草原土	农耕地	2.7419/2.6566	0.9581/0.9717
S-08	30°12'44.3"N 81°12'3.50"E	耕作草原土	农耕地	2.7612/2.4403	0.9305/0.9736
S-09	30°14'53.0"N 81°10'42.6"E	高山草甸土	高盖度草地	2.6541/2.2702	0.9396/0.9785
S-10	32°27'37.6"N 80°09'32.4"E	耕作草原土	农耕地	2.5457/2.2234	0.9474/0.9551
S-11	33°26'13.6"N 79°45'36.7"E	高山草甸土	高盖度草地	2.7443/2.6027	0.9197/0.9835
S-12	30°11'28.7"N 81°16'22.8"E	高山草甸土	高盖度草地	2.6276/2.3026	0.9866/0.9821

* 机械组成/微团聚体

3.2 分形维数与土地利用

分形维数与土壤质地密切相关,粘粒含量越高维数值越大,砂粒含量越高维数值越小。这是前人研究的结论,许多文献已作了详细的分析,就不再赘述。本研究认为土壤质地是影响土壤非线性分形特征的内在因素,而某些环境条件的变化和人类活动是不可忽视的外因。把表2中的结果按土地利用方式进行统计分析表明(图5),研究区土壤颗粒组成

分形维数(D_p)的大小关系为:裸地(2.7351)>耕地(2.6829)>高盖度草地(2.6475)>稀疏灌丛草地(2.4535);微团聚体组成分形维数(D_a):裸地(2.6393)>耕地(2.4401)>高盖度草地(2.4184)>稀疏灌丛草地(2.3836),两者的变化趋势一致。土壤风蚀是高原干旱半干旱区的主要生态环境问题之一,它对土壤的搬运和堆积作用改变了土壤的砂粒和粘粒含量,从而影响了不同土地利用下的土壤分

形维数。在干旱、多风的气候条件下,裸地由于缺乏植被的覆盖,土壤易被大风搬运;耕地在人类活动作用下,特别是当地老百姓对耕地休耕以前的翻耕使土壤更加疏松,为风蚀搬运提供了物质来源。而灌丛草地和高盖度草地抗风蚀能力强,土壤不易被搬

运,反而易堆积。因此,土壤分形维数不但能综合反映出土壤质地特征,也能定量反映出生态环境演变过程中土壤变化与环境因子以及人类活动之间的关系。图5中标准偏差的比较分析也充分证明了这一点,耕地样品的标准偏差明显高于其它三种。

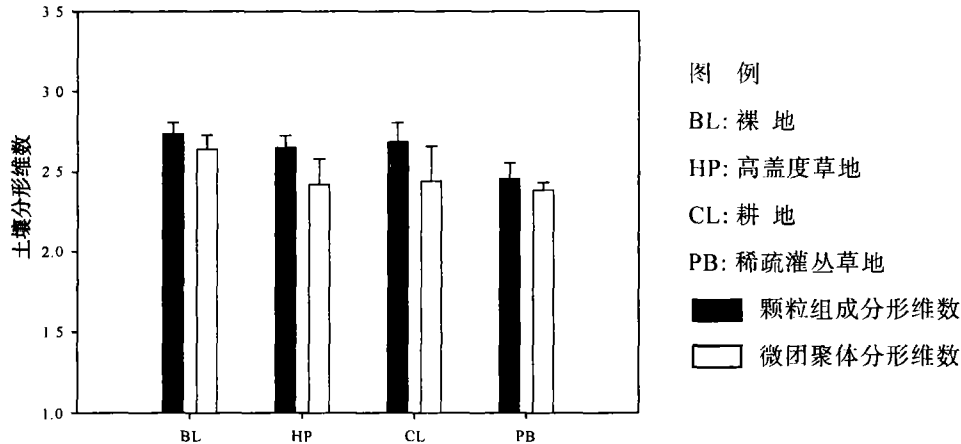


图5 不同土地利用方式下的土壤分形维数统计分析

Fig.5 Statistical assessment of soil fractal dimension of soil under various land-use methods

3.3 土壤分形特征与土壤肥力

土壤水分和土壤通气性是反映土壤肥力的两个最重要指标^[12]。Tyler 和 Wheatcraft^[2,3], Rieu 等^[13,14], 黄冠华和詹卫华^[15]等分别推导出利用土壤分形维数表征土壤水分特征曲线模型,并运用土壤水分特征曲线模型拟合得到土壤空隙分形维数 D' 与土壤颗粒分形维数 D 之间的线性关系: $D' = 0.738D + 0.719$, 用土壤分形维数刻画其肥力特征是可行的。图6和图7表明,随着土壤分形维数的增加,土壤中的有机质和有效氮呈现出波动性下降的趋势,图7中的下降趋势更为显著,土壤微团聚体组成的分形维数与土壤肥力表现出很强的相关性。变化的转折点大致位于 $D_p = 2.65$ 和 $D_a = 2.44$ 处。图6中的距平分析显示,当 $D_p < 2.65$ 时,土壤肥力多在平均值以上作大幅度变化;而 $D_p > 2.65$ 时,土壤肥力在平均值以下作小幅度变化。

图7中的距平分析显示,当 $D_a < 2.44$ 时,土壤有机质和有效N含量基本在平均值以上波动;当 $D_a > 2.44$ 时,土壤有机质和有效N含量在下降后又开始上升,但刚达到平均值后又下降,整个过程的波动范围仍位于平均值以下。

综前所述可以得出,研究区的土壤分形维数保持在 $D_p < 2.65$ 和 $D_a < 2.44$ 时,土壤肥力最佳。这

为土壤质量评价以及土壤耕作、施肥和改良提供了极其重要的理论依据和新方法。

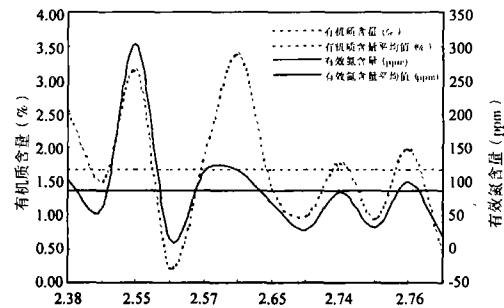


图6 土壤颗粒组成分形维数(D_p)与土壤肥力距平分析

Fig.6 Fractal dimension of soil particle size distribution(D_p) and soil fertility

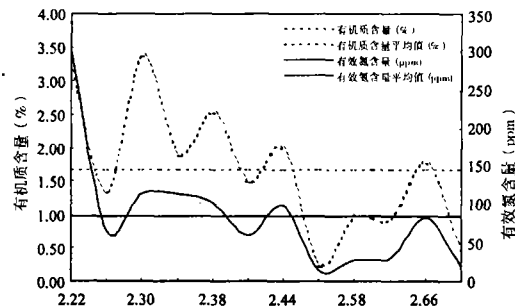


图7 土壤微团聚体组成分形维数(D_a)与土壤肥力距平分析

Fig.7 Fractal dimension of soil micro-aggregate distribution(D_a) and soil fertility

3.4 典型剖面土壤分形特征纵向变化

采集四种土地利用方式的土壤剖面分层样,按前述方法完成实验室分析并计算不同深度的 D_p 值和 D_a 值(见表 3),并作出不同土地利用方式下的 D_p 和 D_a 纵向变化对照图(图 8)。

表 3 不同剖面深度的土壤分形维数

Table 3 Fractal dimension of soil in different depth

采样深度 (cm)	土地利用方式			
	BL	HP	CL	PB
0~5	2.6983/2.6731	2.6406/2.1989	2.4792/2.0943	1.9525/1.8142
5~10	2.8402/2.5168	2.6067/2.2253	2.4799/2.0747	2.4151/2.2980
10~15	2.8031/2.5787	2.6996/2.4490	2.7316/2.4035	2.4925/2.5158
15~20	2.7278/2.6331	2.7522/2.5991	2.7520/2.5301	2.7442/2.2840
20~30	2.5866/2.4416	2.4263/2.2453	2.6301/2.4089	2.2230/2.1480
30~40	2.6233/2.5146	2.3900/2.6434	2.7163/2.6621	2.3749/2.2983

注:表中数据为 D_p/D_a 。

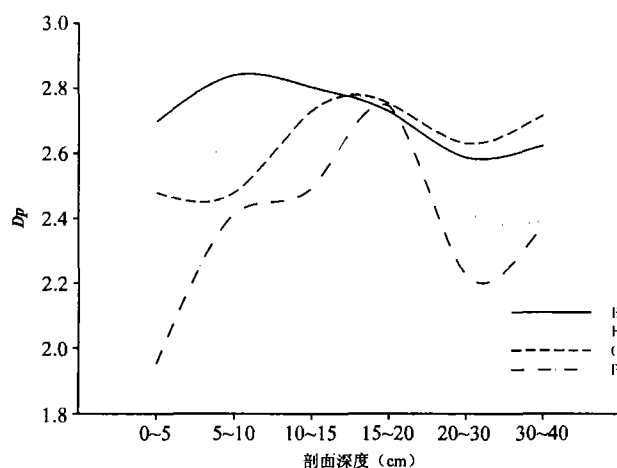


图 8 不仅反映了 4 种土地利用类型土壤分形维数纵向变化的差异性,也反映出同一土地利用方式下土壤分形维数的渐序变化规律。 D_p 值随着采样深度的增加而增大,而在 15~20cm 深度范围内,4 种不同的土地利用下的土壤 D_p 值出现等值(除裸地外,其它 3 种类型的 D_p 峰值出现在该层次),此后随着深度的增加而减小。裸地 D_p 峰值出现在前一层次(5~10cm),这可能与土壤风蚀作用有关。至于 4 种类型的 D_p 大小关系随深度发生交替变化的原因还有待进一步研究。一从图 8 的第二图可知, D_a 值随着采样深度的变化而呈现显著的波形变化。值得关注的是,耕作方式的 D_a 峰值比其它三种方式更早出现,位于 10~15cm 层次。这充分证明了人类耕作通过改变土壤微团聚对土壤的熟化作用。

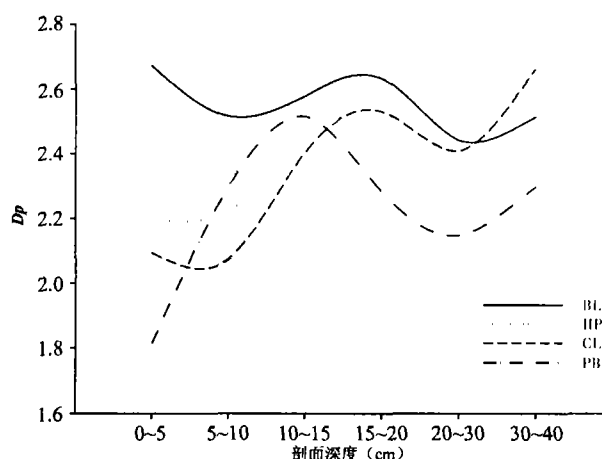


图 8 不同剖面深度的土壤颗粒组成和微团聚体组成分形维数(D_p 和 D_a)

Fig.8 Fractal dimension of soil particle size and micro-aggregate distribution(D_p and D_a) in different profile depth

4 结 论

采用基于质量分布的分形维数的计算方法,对藏西高原干旱半干旱区 4 种土地利用方式的土壤颗粒组成分形和微团聚体组成分形特征进行了研究,并分析了土壤分形维数与土地利用、土壤肥力的关系,及其不同土壤层次的纵向变化。研究结果表明:

(1)土壤分形维数不仅可以反映土壤质地的均一程度,而且体现了自然环境变化和人类活动对土壤理化性质的影响。

(2)土壤肥力与土壤分形维数有显著的相关性。

研究区的土壤分形维数保持在 $D_p < 2.65$ 和 $D_a < 2.44$ 时,土壤肥力最佳。

(3)对典型剖面土壤分形维数研究发现, D_p 值和 D_a 值随深度呈波状变化,峰值出现的深度与土地利用方式和人类活动密切相关。

参考文献(References):

- [1] XiongJihong, LiuMiaolong. Fractal phenomena and the study of geographicsystem. *Journal of Hubei University* (Natural Science, 1996,18(4):397~400. [熊继红,刘妙. 分形现象与地理系统研究[J]. 湖北大学学报(自然科学版),1996,18(4):397~400.]
- [2] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Soil Sci. Am. J.*, 1989, 53: 987

- ~996.
- [3] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle size distributions: analysis and limitations. *Soil Sci. Am. J.*, 1992, 56: 362~369.
- [4] Peiling Yang et al. Soil fractal character token by particle-mass distribution. *Sci. Bulletin* .J. 1993, 38(20): 1896~1899. [杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896~1899.]
- [5] A. Castrignano, M. Stelluti. Fractal Geometry and Geostatistics for describing the Field Variability of Soil Aggregation. *J. Agric. Engng Res.* 1999, 73: 13~18.
- [6] Y. Pachepsky et al. Fractals in soil science(Book review). *Geoderma*, 2001, 102: 391~393.
- [7] H. Millan et al. Fragmentation fractal dimensions of Vertisol samples: influence of sieving time and soil pretreatment. *Geoderma*, 2002, 109 :75~83.
- [8] AryaLM, Paris]F. A physical empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data[J]. *SoilSoc. Am. J.*, 1981, 45: 1023~1031.
- [9] TurcotteDL. Fractal fragmentation[J]. *J. GeographyRes.*, 1986, 91 (12): 1921~1926.
- [10] Alexandra Kravchenko, RenduoZhang. Estimating the soil-water retention from particle-size distribution: a fractal approach[J]. *Soil Soc. Am. J.*, 1998, 62(3): 171~179.
- [11] Gong Adu, He Yurong, 1993. Study on fractal features of soil structure of degraded soil in dry and hot valley region of Jinsha River. *Journal of Soil and Water Conservation. J.* 15(3), 112~115. [宫阿都, 何毓蓉. 金沙江干热河谷区退化土壤结构的分形特征研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 112~115.]
- [12] Zhou Mingzheng. The generality of soil fertility[M]. Hangzhou: Scientific and Technological Press of Zhejiang, 1985. [周鸣铮等. 土壤肥力学概论[M]. 杭州: 浙江科科学技术出版社, 1985.]
- [13] Rieu M., Sposito G. Fractal fragmentation, soil porosity water properties: I. Theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1991, 55: 1231~1238.
- [14] Rieu M., Sposito G. Fractal fragmentation, soil porosity water properties: II. Application. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1991, 55: 1239~1244.
- [15] Huang Guanhua, Zhan Weihua. Fractal property of soil particle size distribution and its application. *Acta Pedologica Sinica, J.*, 2002, 39(4): 490~497. [黄冠华, 詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 490~497.]

Fractal Characteristics of Soil and its Application in the Arid and Semi-arid Region, Tibet Plateau

WANG Xiao-dan¹, LIU Gang-cai¹, LIU Shu-zhen¹ and NAN Da-wa²

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science and Ministry of Water

Conservancy, Rd, No.9, section 4 of Renming South, Chengdu 610041;

2. Tibet Geology and Geothermy Team, Rd, Jingzhu, Lasa 850000)

Abstract: Based on sampling and measuring whole and layered samples, fractal dimension have been figured out by the principle of soil particle size. The study also analyzed the relationship between fractal dimension and land-use patterns, soil fertility. Even discussed vertical distribution character of fractal dimension in various depth of profile. The results indicates that (i), fractal dimension can be applied to estimate symmetrical degree of soil texture and even can show indirectly the effect of environment change and human activities on soil properties, (ii), there is an obvious correlation between fractal dimension of and soil fertility, i. e. when the fractal dimension of soil particle size distribution $D_p < 2.65$ and the fractal dimension of soil micro-aggregate size distribution $D_a < 2.44$ soil fertility is best, (iii), D_p value and D_a value would fluctuate flexuously with soil depth. The depth which peak value of fractal dimension exists in is quite relative to land-use methods and human activities.

Keywords: soil; fractal character; land use; soil fertility; Ali